第47卷 第2期
2024年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 2
Feb. 2024

祁连山地区复合生态系统韧性时空演化及障碍因子识别

刘玒玒， 刘书芳

（西安财经大学管理学院，陕西 西安 710100）

摘 要：祁连山地区是我国重要的生态功能区，也是我国生态环境脆弱区之一，研究祁连山地区自然-经济-社会复合生态系统韧性，以期有效治理祁连山地区生态环境问题。构建三维空间矢量模型、耦合协调模型和障碍度模型，测度2007—2021年祁连山地区复合生态系统韧性和子系统耦合协调性，揭示影响复合生态系统韧性提升的障碍因子，并借助地理信息系统技术分析复合生态系统韧性的空间演化过程。结果表明：(1) 祁连山地区复合生态系统韧性呈上升趋势，空间上呈现从东部逐渐向西部降低的趋势；自然子系统韧性呈下降趋势，空间上呈现中东部向西北部逐渐降低的趋势；经济子系统韧性呈上升趋势，且增速较快，高经济韧性集中分布于东部和北部；社会子系统韧性上升幅度不大，高社会韧性集中分布于东部。(2) 祁连山地区复合生态系统韧性耦合度提升明显，已达到高水平耦合；耦合协调度呈波动上升，已达到中级协调等级。(3) 自然子系统对复合生态系统韧性提升影响较大，来自经济子系统的指标障碍度提升明显。

关 键 词：复合生态系统韧性；三维空间模型；耦合协调度；障碍因子；祁连山地区
文章编号：1000－6060(2024)02－0237－11(0237～0247)

祁连山地区是中国重要的生态功能区，是中国西北地区重要水源涵养地和生态安全屏障，亦是生态环境脆弱区[1-2]，其生态环境保护对西部地区的生态稳定至关重要。祁连山地区因矿藏、水资源富集，近年来，局部生态遭到人为破坏十分严重。党的十八大以来，习近平总书记高度关注祁连山地区的生态环境破坏问题，多次对祁连山地区生态修复工作作出重要批示，要求尽快解决环境保护与修复存在的突出问题。因此，测算祁连山地区复合生态系统韧性[3-4]，并分析其时空演变特征[5-6]，揭示其背后的障碍因子[7-8]，有助于为祁连山地区生态保护与修复治理提供客观依据，对科学保护祁连山生态环境有重要意义。

生态环境破坏对社会发展和区域经济产生难以预料的影响，可以引入“生态韧性”概念进行研究[9-10]。生态韧性凸显了自组织、学习和适应的先天潜力，同时可以吸收干扰并经历变化的能力[11]，有助于保持系统的功能、结构和特性[12]。有学者认为生态韧性的重点应在解决生态问题而不是技术的韧性[13-14]。通过梳理国内外已有文献可知，国外学者对生态韧性的研究侧重于内涵、评价体系、测度等方面[15-16]。国内针对生态韧性的理论研究和实证研究均处于起步阶段，相关研究主要集中于2个方面：一是理论研究方面，围绕生态韧性的概念界定和理论解析等方面展开[17-18]；二是实证研究方面，通过建立指标体系和评价模型测度生态韧性[19-20]，并揭示其背后的驱动因子[21]和障碍因子[22]。目前，生态韧性的研究视角主要以省域和市域为主[23-24]，很少从生态功能区和生态环境脆弱区开展研究，祁连山地区生态环境脆弱，作为我国重要的生态功能区，生态环境破坏严重，关于其生态韧性的研究较少。

生态韧性评价指标体系中反映社会和经济状况的指标相对较少[25-26]，致使难以准确描述复合生态系统韧性的内涵[27]。因此，构建自然-经济-社会

收稿日期：2023-05-10； **修订日期**：2023-06-19
基金项目：国家自然科学基金（72074198）；陕西省社会科学基金项目（2021R015）；陕西省教育厅哲学社会科学重点研究基地项目（20JZ052）资助
作者简介：刘玒玒（1985-），女，副教授，硕士生导师，主要从事水资源保护与生态环境建设等方面的研究. E-mail: 2015010007@xaufe.edu.cn
通讯作者：刘书芳（1994-），女，硕士研究生，主要从事生态环境建设等方面的研究. E-mail: sf307323@vip.163.com

复合生态系统韧性评价体系，利用三维空间矢量模型、耦合协调模型和障碍度模型测度祁连山地区复合生态系统韧性和子系统耦合协调性，并分析其时空演变特征，揭示影响复合生态系统韧性提升的障碍因子，可以拓展生态韧性研究的理论视野，为祁连山地区提升生态韧性提供理论支撑。

1 研究区概况

祁连山位于我国甘肃西部和青海东北部，是我国西部干旱、半干旱区重要的生态屏障，也是我国生态环境脆弱区之一。祁连山地区草原面积广大，水力资源丰富，畜牧业是主要产业。祁连山地区煤、铁、石油矿藏资源丰富，随着工业发展，采矿业逐渐成为祁连山地区的主要产业，由此造成了多种生态破坏问题。国家高度关注祁连山地区生态环境问题，大量学者开展相关研究，由于研究角度和重点不同，致使不同学者关于祁连山地区边界的确定不尽相同。

本文是从宏观层面研究祁连山地区整个区域的复合生态系统韧性，将其划分为自然、经济、社会3个子系统。因此，将祁连山脉所辐射的30个县(区)[甘肃省的10个县(区)、青海省的20个县(区)]作为本文的研究区域(图1)。

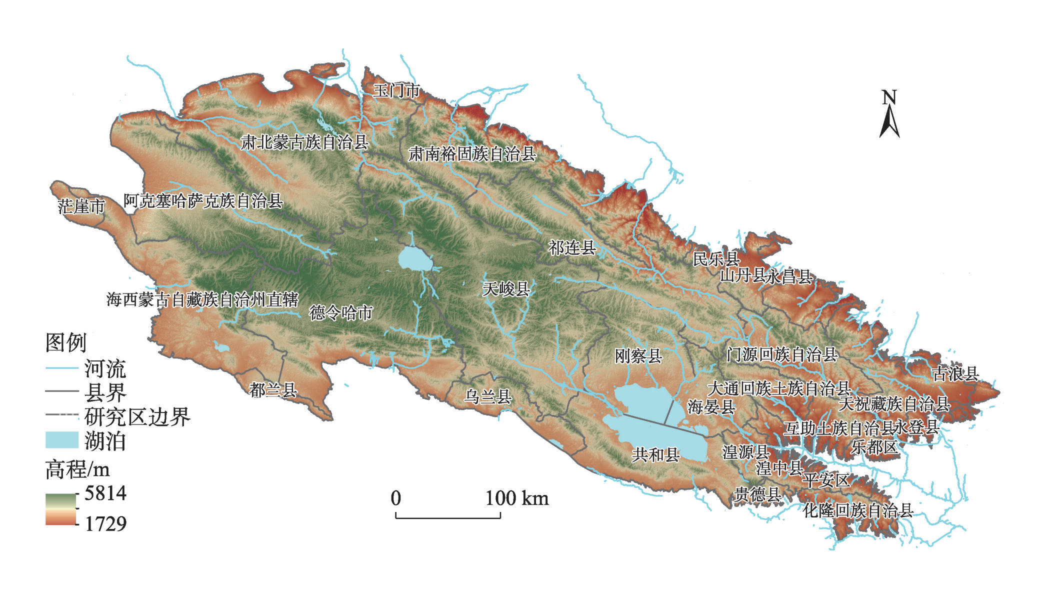


图1 研究区示意图

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据与方法

2.1 研究方法

2.1.1 复合生态系统韧性含义及评价指标 复合生态系统是自然、经济和社会3个子系统组合而成的统一体，其韧性是指受到内部和外部多重因素干扰后表现出的抵抗性，以及恢复原有状态和适应变化的能力。自然子系统韧性是在生态环境遭受外界干扰后表现出的抵抗性；经济子系统韧性是恢复遭受干扰的生态环境应具备的经济条件；社会子系统韧性是人类活动过程中利用自然资源，以及对生态环境的改造和保护，即对变化的适应能力。本文研究祁连山地区复合生态系统韧性，其中3个子系统的关系和韧性含义表征如图2所示。

本文在选取自然子系统指标时，鉴于祁连山地区山脉连绵起伏、纵横交错，选取了山区生态环境评价的常用指标，同时考虑到祁连山地区当前面临的植被减少、林地退化、水土流失和沙化等主要生态问题。本文选取荒漠化指数(C1)、水土流失指数(C2)、土地盐碱指数(C3)、水源涵养指数(C4)、生物丰度指数(C5)、林草覆盖率(C6)作为自然子系统指标。在选取经济子系统指标时，考虑到农牧区在祁连山地区占比较大，并且畜牧业是自古以来的传统产业，选取了偏重于农村经济评价的常用指标。本文选取农林牧业总产值增长率(C7)、农村居民人均纯收入(C8)、国内生产总值(GDP)增长率(C9)、二产占比(C10)、公共财政支出占比(C11)作为经济子

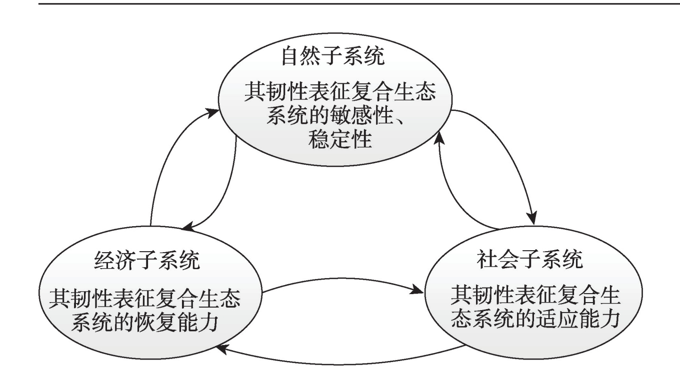


图2 复合生态系统各子系统的关系和韧性含义表征图

Fig. 2 Diagram of the relationships between the subsystems of a complex ecosystem and the implications of resilience

系统指标。其中GDP增长率反映宏观经济总体状况；农村居民人均纯收入反映农村居民生活水平状况；农林牧业总产值增长率反映当地主要产业的发展状况；二产占比反映当地工业化进程；公共财政支出占比反映政府经济投入情况。在选取社会子系统指标时，将人口数量和民生改善作为主要方面，同时考虑反映地区竞争力的科学技术和教育发展程度。本文选取人口密度（C12）、人口增长率（C13）、人均耕地面积（C14）、城镇化率（C15）、科技投入强度（C16）和教育投入强度（C17）作为社会子系统指标。其中人口密度和人口增长率反映人口数量和变化情况；人均耕地面积反映民生改善情况；城镇化率反映当地城建情况；科技投入强度和教育投入强度反映科学技术和教育发展程度。参考已有相关研究成果，制定了祁连山地区复合生态系统韧性评估的指标体系，用C表示，其中+表示正向指标，–表示负向指标，如图3所示。

2.1.2 熵权法 本文将时间序列与指标熵相结合，更加准确地确定各指标的权重，指标权重越大表示该指标在评价体系作用越大，反之成立。

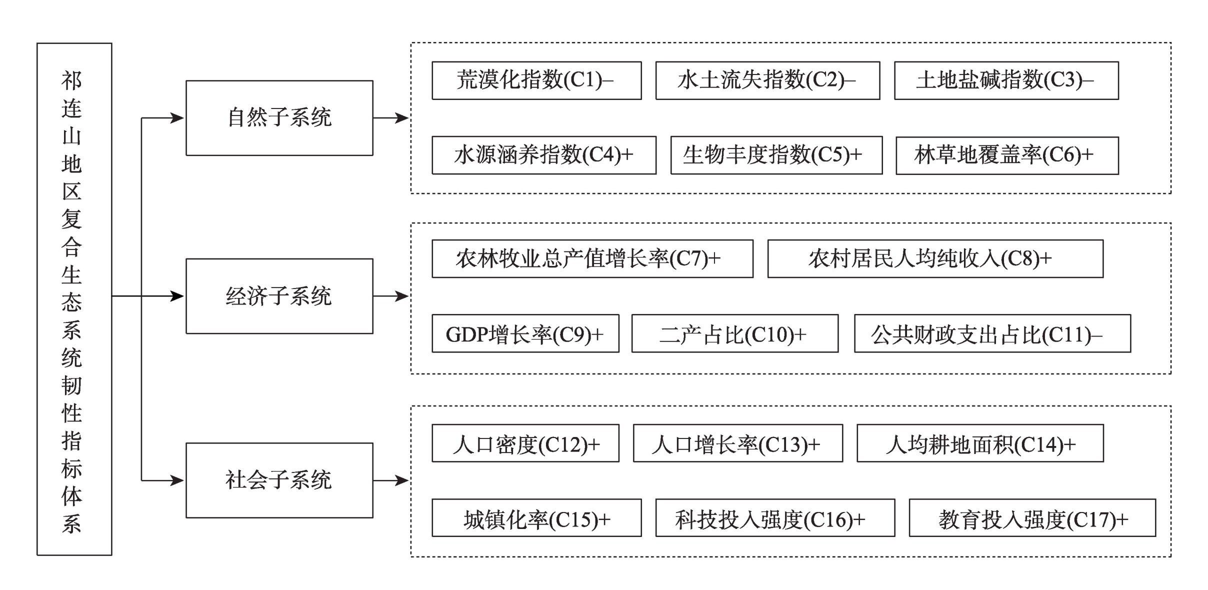
$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_j H_j} \tag{1}$$

$$H_j = -\frac{1}{\ln(t \times n)} \sum_\alpha \sum_i f_{\alpha ij} \ln(f_{\alpha ij}) \tag{2}$$

$$f_{\alpha ij} = \frac{R_{ij}}{\sum_\alpha \sum_i R_{ij}} \tag{3}$$

式中：ω_j 为指标j的权重；n为指标总数；H_j 为指标j的信息熵；t为研究时段；$f_{\alpha ij}$ 为第α年，第i个县（区）的第j个指标占比（%）；R_{ij} 为标准化指标值。

2.1.3 三维空间矢量模型 复合生态系统的发展过程中，自然、经济和社会3个子系统的结构和功能各不相同，且彼此间相互联系和制约，存在着复杂的非线性关系[28]。因此，本文从三维复合系统出发，构建祁连山地区自然–经济–社会复杂生态系统三维空间矢量模型（图4）。向量OS表示复合生态系统韧性的最优发展轨迹，自然、经济、社会子系统的韧性发展轨迹向量OP不能完全与其重合。基于此，本文定义了复合生态系统韧性的发展度、协调度和发展指数的概念。计算步骤如下：



注："+"表示正向指标；"–"表示负向指标。

图3 复合生态系统韧性评价指标体系

Fig. 3 Index system of resilience evaluation of complex ecosystem

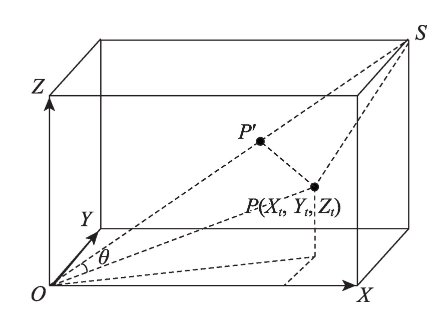


图4 韧性三维空间矢量模型

Fig. 4 Three-dimensional space vector model of resilience

(1) 各子系统韧性发展指数

$$\begin{cases} X_t = \sum_j \omega_j R_{1ij} \\ Y_t = \sum_j \omega_j R_{2ij} \\ Z_t = \sum_j \omega_j R_{3ij} \end{cases} \tag{4}$$

式中：X_t、Y_t、Z_t分别为自然、经济、社会子系统韧性发展指数；R_{1ij}、R_{2ij}、$R_{3\alpha ij}$分别为自然、经济、社会子系统韧性的标准化指标值。

(2) 韧性发展度

$$\mathrm{OP} = \sqrt{(X_t - 0)^2 + (Y_t - 0)^2 + (Z_t - 0)^2} = \sqrt{X_t^2 + Y_t^2 + Z_t^2} \tag{5}$$

式中：OP为复合生态系统韧性发展度。

(3) 韧性协调度

韧性协调度是指祁连山地区复合生态系统韧性的实际发展轨迹与最优发展轨迹的拟合度，将偏离角度θ定义为复合生态系统韧性协调度，θ值与韧性协调度负相关，即θ值越大，则3个子系统发展的协调度越差。

$$\theta = \arccos\left[\frac{(\mathrm{OP}^2 + \mathrm{OS}^2 - \mathrm{SP}^2)}{2 \times \mathrm{OP} \times \mathrm{OS}}\right] \tag{6}$$

式中：SP为目前复合生态系统韧性状态与最优状态的差距；OS为复合生态系统韧性的最优发展轨迹。

(4) 韧性发展指数

韧性发展指数是对祁连山地区复合生态系统韧性水平的真实反应，将沿最优发展轨迹的实际长度定义为复合生态系统韧性发展能力，在三维空间矢量模型示意图中即为向量OP′的长度，向量OP′与韧性水平正相关，OP′的值越接近OP，说明祁连山地区复合生态系统韧性发展水平越接近于最优发展水平。

$$\mathrm{OP}' = \mathrm{OP} \times \cos\theta \tag{7}$$

式中：OP′为韧性发展指数。

2.1.4 耦合协调度模型 利用耦合协调度模型测算自然、经济、社会3个子系统相互作用的程度，并进一步分析3个子系统在耦合度基础上的良性程度，反映协调状况的好坏，从而揭示3个子系统之间的协同水平，步骤如下[29]：

(1) 耦合度(C)

耦合度$C \in [0, 1]$，C值越大，说明3个子系统的关联度越大。

$$T = \gamma_1 \times U_1 + \gamma_2 \times U_2 + \gamma_3 \times U_3 \tag{8}$$

$$C = \frac{(U_1 \times U_2 \times U_3)^{1/3}}{(U_1 + U_2 + U_3)/3} \tag{9}$$

式中：T为3个子系统的综合评价值；U_1、U_2、U_3分别为自然子系统、经济子系统、社会子系统；γ_1、γ_2和γ_3均为待定系数，且$\gamma_1 + \gamma_2 + + \gamma_3 = 1$，认为3个子系统同等重要，所以$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 1/3$。

(2) 耦合协调度(D)

耦合协调度是反映3个子系统之间的耦合关系中良性耦合程度的指标。$D \in [0, 1]$，D值越大，说明3个子系统的协同水平越高。

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{10}$$

2.1.5 障碍诊断模型 通过构建障碍诊断模型，识别影响祁连山地区复合生态系统韧性提升的障碍因子，障碍度值越大，说明对韧性提升的制约程度越高。

$$O_j = \frac{\omega_j (1 - R_{\alpha ij})}{\sum_{i=1}^{m} \omega_j (1 - R_{\alpha ij})} \tag{11}$$

式中：O_j为单项指标j的障碍度；ω_j为指标j的权重；$R_{\alpha ij}$为标准化指标值。

2.2 数据来源

本文分析数据资料源于《甘肃省统计年鉴》(2008—2022年)和《青海省统计年鉴》(2008—2022年)，以及甘肃省和青海省的部分县(市、区)统计年鉴和公报。矢量数据来源于DEM数据下载自全国地理信息资源目录服务系统(http://www.webmap.cn)，研究区边界范围数据源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn)。

3 结果与分析

3.1 复合生态系统韧性时空特征分析

根据自然断点法将自然子系统、经济子系统、

社会子系统和复合生态系统的韧性水平划分为5级，分别为低韧性、较低韧性、中等韧性、较高韧性和高韧性。根据2007—2021年祁连山地区30个县(区)的复合生态系统韧性计算结果，借助ArcGIS 10.2呈现祁连山地区2007年和2021年的韧性等级(图5)。

2007—2021年祁连山地区复合生态系统韧性

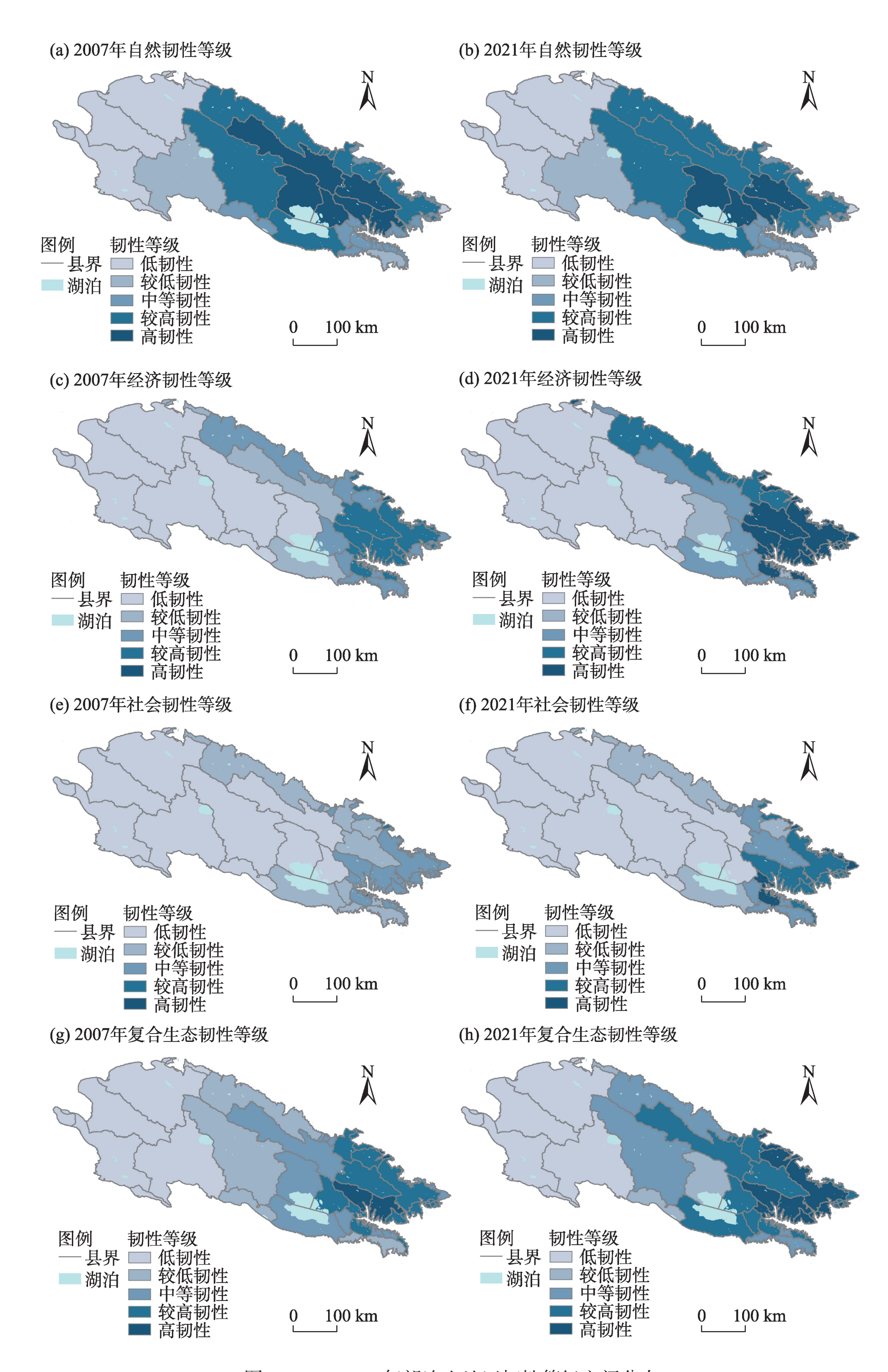


图5 2007、2021年祁连山地区韧性等级空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of resilience classes in the Qilian Mountain area in 2007 and 2021

呈上升趋势。根据图5,2007年和2021年祁连山地区复合生态系统韧性在空间上均表现为东部等级高,西部等级低,且呈现从东部逐渐向西部降低的趋势。自然子系统韧性呈下降趋势,韧性等级高的地区明显减少,在空间上表现为从中东部向西北部逐渐降低的规律。经济子系统韧性呈上升趋势,且增速较快,尤其以东部和北部提升明显,韧性等级低的地区大幅减少,在空间上表现为中等韧性及以上等级主要集中于东部和北部,中等韧性以下等级主要集中于中部和西部。社会子系统韧性呈上升趋势,但仍以中等韧性等级以下为主,在空间上表现为中等韧性及以下等级主要集中于中部和西部,中等韧性以上等级主要集中于东部。究其原因,祁连山地东部地形平坦、海拔较低、林草植被覆盖度高、气候较适宜、水源涵养能力好,较少存在水土流失、土地沙化和盐碱化等生态问题;西部地区山脉众多、戈壁荒漠面积大、水土流失严重,加之长期不合理灌溉,导致土地盐碱化、水资源浪费严重。因此,相较于西部地区,东部地区自然子系统恢复能力更强。祁连山地区东部临近大城市,科教投入占比较大,人口、经济和社会发展水平相对更高;西部地区由于自然环境恶劣,距大城市较远,人口较少且物质生活水平低,科研和教育投入不足,农牧业为主要产业,因此,面对经济和社会环境扰动,东部比西部恢复原有状态的速度更快。综合上述自然、经济和社会现状,使得祁连山地区复合生态系统韧性等级东部地区高于西部地区,且提升幅度大,并且当任一子系统出现问题时,其他子系统能快速做出调整以适应各种破坏并恢复原有状态。通过对比复合生态系统和自然、经济、社会子系统韧性等级分布图发现,复合生态系统韧性等级上升的县(区)是由于经济和社会子系统韧性等级上升,下降的县(区)是由于自然子系统韧性等级下降,由此可见,祁连山地区复合生态系统韧性等级的变化,自然子系统韧性起到至关重要的作用。

根据2007—2021年祁连山地区30个县(区)的复合生态系统韧性计算结果,对比分析2007年和2021年不同韧性等级数量在空间上的分布变化(图6)。根据图6,对比2007年和2021年祁连山地区复合生态系统韧性值各等级的县(区)数量及其占比变化情况,其中韧性等级数量变化最明显的为低韧性等级、中等韧性等级、高韧性等级。低韧性等级从2007年占比41.38%降至2021年占比34.48%,中等韧性等级和高韧性等级分别从2007年占比17.24%和3.45%上升至2021年占比24.14%和10.35%。除此之外,较低韧性等级和较高韧性等级也有明显变化,较低韧性等级从2007年占比20.69%降至2021年占比17.24%,较高韧性等级从2007年占比17.24%升至2021年占比20.69%。整体而言,祁连山地区复合生态系统韧性等级有所提升,表明受到外界干扰后的恢复能力有所增强,尤其是祁连山东部地区高韧性等级提升幅度较大,在面对系统内、外部干扰时能更好地维持各子系统间的稳定性。

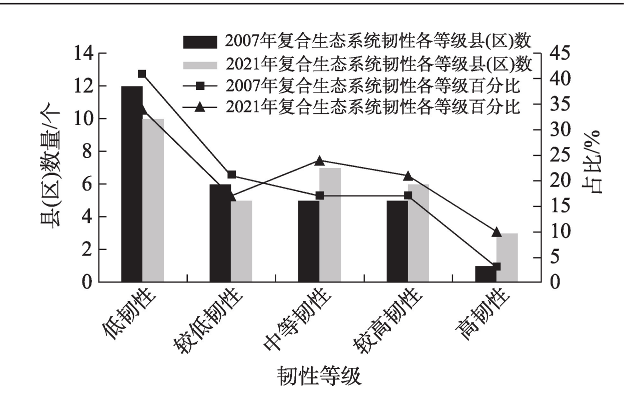


图6 2007—2021年祁连山地区复合生态系统韧性各等级县(区)数量及其所占比重

Fig.6 Number and proportion of counties (districts) in each level of complex ecosystem resilience in the Qilian Mountain area from 2007 to 2021

3.2 复合生态系统韧性耦合协调分析

根据复合生态系统耦合度和耦合协调度的计算结果,分析2007—2021年祁连山地区自然、经济、社会3个子系统相互作用的程度,以及三者的耦合协调水平。基于相关学者的研究成果,本文耦合度分级标准见表1,耦合协调度分级标准见表2。根据2007—2021年祁连山地区复合生态系统的耦合度和耦合协调度计算结果(图7),耦合度和耦合协调度等级如表3所示,分析2007—2021年3个子系统相互作用的程度,以及三者的耦合协调水平。

根据图7可以看出,2007—2012年耦合度提升明显,此后保持在较高水平。2007—2011年耦合度

表1 耦合度分级标准

Tab. 1 Coupling degree grading standard

耦合度	[0.0, 0.3]	(0.3, 0.5]	(0.5, 0.8]	(0.8, 1.0]
等级	低水平耦合	拮抗状态	磨合状态	高水平耦合

表2　耦合协调度分级标准

Tab. 2　Coupling coordination degree grading standard

耦合协调度值	耦合协调度等级	耦合协调度值	耦合协调度等级
[0.0, 0.1]	极度失衡	(0.5, 0.6]	勉强协调
(0.1, 0.2]	严重失衡	(0.6, 0.7]	初级协调
(0.2, 0.3]	中度失衡	(0.7, 0.8]	中级协调
(0.3, 0.4]	轻度失衡	(0.8, 0.9]	良好协调
(0.4, 0.5]	濒临失衡	(0.9, 1.0]	优质协调

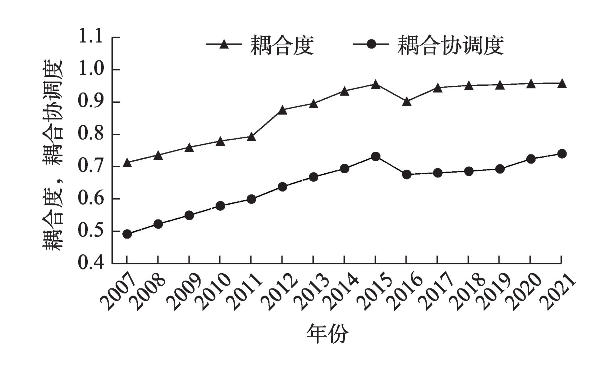


图7　2007—2021年祁连山地区复合生态系统耦合度和耦合协调度

Fig. 7　Coupling degree and coupling coordination degree of complex ecosystem in the Qilian Mountain area from 2007 to 2021

处于磨合状态，3个子系统的相互作用不显著，表明当地民众的生产和生活对自然环境的影响有限。直至2012年，耦合度变为高水平耦合，3个子系统的相互作用程度增强，关联性升高，表明任一子系统的变化必然引起其他2个子系统的连锁反应。

根据图7可以看出，2007—2021年3个子系统的耦合协调状况呈波动上升趋势，2007年耦合协调度仅为0.491，处于濒临失衡等级，表明自然、经济、社会3个子系统的发展是不协调的，此阶段当地民众以牺牲生态环境为代价换取经济增长，该种增长方式无法实现经济发展和社会稳定。2012年耦合协调度增至0.637，协调发展状况升至初级协调等级，此后耦合协调水平逐渐优化。党的十八大报告把生态文明建设纳入中国特色，成为党的行动纲领，各级政府开始重视生态环境保护工作密切相关。2015年协调发展状况升至中级协调等级。2016年协调发展状况出现波动，耦合协调度等级倒退至初级协调等级，原因在于祁连山部分地区出现了违规采矿、超载放牧等一系列破坏生态环境的问题。中央和地方政府对祁连山地区生态环境保护与恢复治理工作非常重视，采取了一系列行之有效的措施，直至2020年，协调发展状况恢复至中级协调等级。

3.3　复合生态系统韧性障碍因子分析

根据障碍诊断模型，计算2007—2021年祁连山地区复合生态系统韧性17个指标的障碍度，结果发现制约祁连山地区复合生态系统韧性的因子主要来自于自然子系统，根据各县（区）障碍因子出现频次统计，出现频次高的障碍因子为：C4、C5、C6、C7、C8、C10、C12，可将上述障碍因子作为制约祁连山地区复合生态系统韧性的主要影响指标。障碍度排名前5的指标（表4）分别在30个县（区）出现频次见图8。

表3　2007—2021年祁连山地区复合生态系统耦合度和耦合协调度等级

Tab. 3　Coupling degree level and coupling coordination degree level of complex ecosystem in the Qilian Mountain area from 2007 to 2021

耦合协调程度	2007年	2008—2011年	2012—2014年	2015年	2016—2019年	2020年	2021年
耦合度等级	磨合状态	磨合状态	高水平耦合	高水平耦合	高水平耦合	高水平耦合	高水平耦合
耦合协调度等级	濒临失衡	勉强协调	初级协调	中级协调	初级协调	中级协调	中级协调

表4　祁连山地区复合生态系统韧性主要障碍因子和障碍度

Tab. 4　Main obstacle factors and obstacle degree of complex ecosystem resilience in the Qilian Mountain area　　/%

排序	2007年		2012年		2017年		2021年	
	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度	障碍因子	障碍度
1	C6	7.16	C6	7.31	C6	7.76	C6	7.23
2	C4	6.78	C4	6.93	C4	7.03	C7	7.08
3	C7	6.25	C7	6.87	C7	6.99	C8	6.80
4	C8	5.78	C8	5.94	C8	6.20	C4	6.55
5	C12	5.34	C10	5.11	C5	5.22	C12	6.29

注：C4为水源涵养指数；C5为生物丰度指数；C6为林草地覆盖率；C7为农林牧业总产值增长率；C8为农村居民人均纯收入；C10为二产占比；C12为人口密度。限于篇幅，仅列示部分年份障碍度结果。

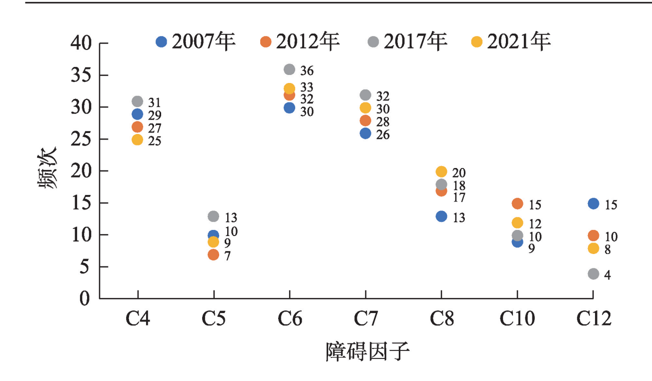


图8 祁连山地区复合生态系统韧性主要障碍因子频次统计

Fig. 8 Frequency statistics of main obstacle factors of complex ecosystem resilience in the Qilian Mountain area

根据表4和图8,C4、C6、C7、C8 4个指标的障碍度排序在2007、2012、2017年和2021年均位列前5。自然子系统的C6障碍度排名始终第一,且出现频次最多,对祁连山地区复合生态系统韧性影响较大,要深入推进生态环境保护与恢复治理,持续抓好国家林草资源保护工作。2007年祁连山地区复合生态系统韧性主要障碍因子大部分来自于自然和经济子系统,且障碍度较高。2012年主要障碍因子大部分依然来自于自然和经济子系统,且障碍度有所升高,来自社会子系统的障碍因子障碍度在降低。2017年来自自然子系统的障碍因子障碍度持续升高,部分县(区)来自经济子系统的障碍因子障碍度有所升高,来自社会子系统的障碍因子障碍度在降低。2021年来自经济和社会子系统的障碍因子障碍度均不断升高,自然和经济子系统是影响复合生态系统韧性水平提升的主要障碍因素。

祁连山地区各县(区)复合生态系统韧性障碍因子的空间差异显著。以2021年为例,祁连山地区各县(区)复合生态系统韧性指标障碍度排名前3的障碍因子如图9所示:C6排名第1的县(区)有17个,主要分布在祁连山地区的东部和中部,C6来自于自然子系统,说明2021年祁连山地区东部复合生态系统韧性提升受自然因素干扰大,这与当地经济和社会子系统发展较好有关,并且经济和社会的发展会对自然生态环境带来不利影响。来自经济子系统的C7、C8和来自自然子系统的C4排名也比较靠前,C7和C4主要分布于祁连山地区的西部,说明祁连山地区西部复合生态系统韧性提升受自然因素和经济因素干扰大,这与当地自然环境恶劣,经济发展落后有关。

4 讨 论

祁连山地区复合生态系统韧性水平空间差异较大,应重点关注西部地区的环境保护和生态恢复,并积极调整产业结构,加大经济发展力度,提升复合生态系统韧性水平,同时保护好东部地区的优势。首先,对于祁连山地区,自然子系统是经济和社会子系统发展的基础条件,对祁连山地区的高质量和可持续发展起到决定性作用。其次,经济子系

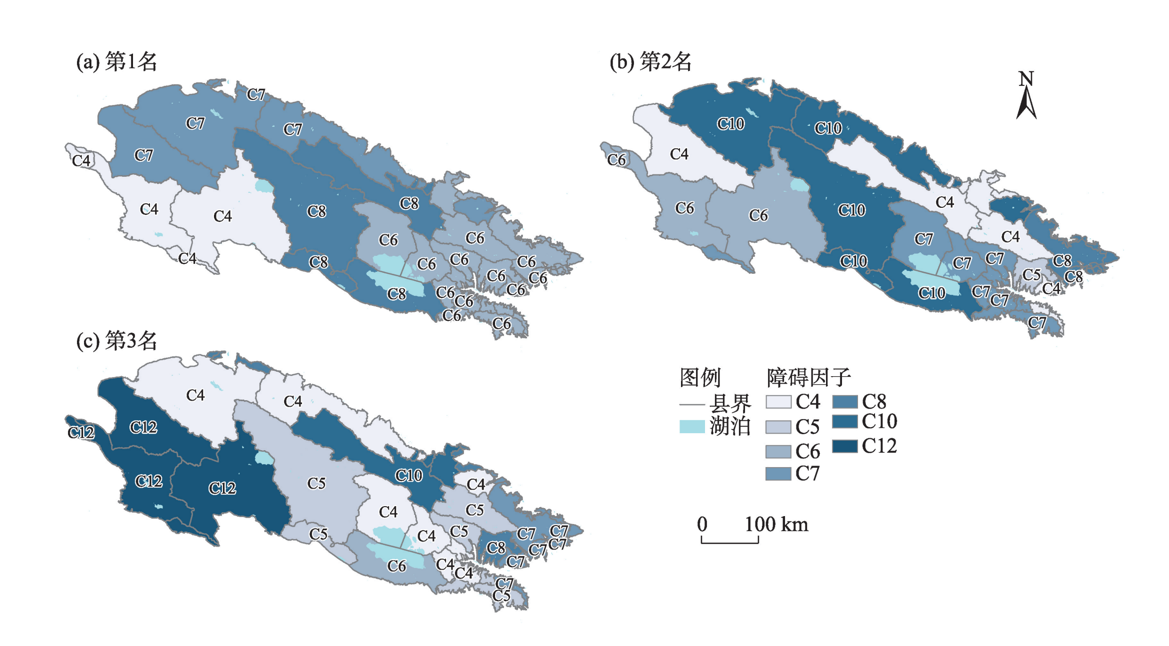


图9 2021年祁连山地区复合生态系统韧性障碍度排名前3的障碍因子

Fig. 9 Top 3 obstacle factors of complex ecosystem resilience in the Qilian Mountain area in 2021

统支撑社会子系统的发展，同时作用于自然子系统，只有强有力的经济支撑才能采取有效措施，保护和改善生态环境。再次，社会子系统中，民生发展状况、城镇化水平和科教投入直接影响人民的生态环境保护意识，应关注当地民生改善和城建情况，加大科技和教育投入，提高当地居民的环保意识。因此，祁连山地区应针对不同区域3个子系统的韧性水平情况，三管齐下采取针对性措施，以期有效治理祁连山地区生态环境问题，促进生态环境综合发展。

祁连山地区的自然、经济、社会子系统发展相互作用程度高、关联性大，且发展状态逐年向好，经济和社会发展对生态环境造成的负面效应逐步减弱，逐渐实现复合生态系统的良性发展。然而，根据协调度的发展曲线发现其发展缓慢，为提升3个子系统的协调发展水平，需要进一步完善和创新现有政策和措施，寻找新的增长点，为祁连山地区复合生态系统韧性提升提供源源不断的动力，以期达到最佳状态。

自然和经济子系统是制约祁连山地区复合生态系统韧性提升的主要障碍因素。东部地区复合生态系统韧性提升受自然因素干扰大，当地经济社会发展水平整体较好，应在经济发展的同时做好生态环境保护，践行“优先生态环境保护，兼顾社会经济发展”的区域发展目标。西部地区复合生态系统韧性提升受自然因素和经济因素干扰大，当地自然环境恶劣，经济发展落后，西部地区应在保护生态环境的前提下，多途径提高经济发展水平，加强基础设施建设，增加科技和教育投入，提高人民生活水平。

5 结 论

（1）2007—2021年祁连山地区复合生态系统韧性呈上升趋势，低韧性等级和中等韧性等级数量减少明显，高韧性等级数量增加明显，其中东部地区高韧性等级提升幅度较大，空间上呈现从东部逐渐向西部降低的趋势；自然子系统韧性呈下降趋势，空间上呈现中东部向西北部逐渐降低的趋势；经济子系统韧性呈上升趋势，且增速较快，高经济韧性集中分布于东部和北部；社会子系统韧性上升幅度不大，高社会韧性集中分布于东部。

（2）2007—2021年祁连山地区复合生态系统韧性耦合度提升明显，已达到高水平耦合；耦合协调度呈波动上升趋势，已达到中级协调等级。

（3）2007—2021年影响连山地区复合生态系统韧性提升的主要障碍因子为：水源涵养指数、生物丰度指数、林草地覆盖率、农林牧业总产值增长率、农村居民人均纯收入、二产占比、人口密度。自然子系统对复合生态系统韧性提升影响较大，来自经济子系统的指标障碍度提升明显。

参考文献（References）

[1] 王聪, 伍星, 傅伯杰, 等. 重点脆弱生态区生态恢复模式现状与发展方向[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7333-7343. [Wang Cong, Wu Xing, Fu Bojie, et al. Ecological restoration in the key ecologically vulnerable regions: Current situation and development direction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7333-7343.]

[2] 张行, 梁小英, 刘迪, 等. 生态脆弱区社会——生态景观恢复力时空演变及情景模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1450-1466. [Zhang Xing, Liang Xiaoying, Liu Di, et al. The resilience evolution and scenario simulation of social-ecological landscape in the fragile area[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1450-1466.]

[3] 白立敏. 基于景观格局视角的长春市城市生态韧性评价与优化研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019. [Bai Limin. Evaluation and optimization of urban ecological resilience in Changchun based on landscape pattern[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019.]

[4] 夏楚瑜, 董照樱子, 陈彬. 城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 116-126. [Xia Chuyu, Dong Zhaoyingzi, Chen Bin. Spatio-temporal analysis and simulation of urban ecological resilience: A case study of Hangzhou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 116-126.]

[5] 李苏, 刘浩南. 干旱区城市化与生态韧性耦合协调的时空格局演化分析——以宁夏为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1281-1290. [Li Su, Liu Haonan. Spatio-temporal pattern evolution of coupling coordination between urbanization and ecological resilience in arid region: A case of Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1281-1290.]

[6] 宁静, 朱冉, 张馨元, 等. 内蒙古区县城市韧性评价与分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1217-1226. [Ning Jing, Zhu Ran, Zhang Xinyuan, et al. Evaluation and analysis of urban resilience of districts and counties in Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1217-1226.]

[7] Walker B, Hollin C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. Ecology & Society, 2004, 9(2): 3438-3447.

[8] Bagheri M, Delbari S H, Pakzadmanesh M, et al. City-integrated renewable energy design for low-carbon and climate-resilient communities[J]. Applied Energy, 2019, 239: 1212-1225.

[9] Martin R, Sunley P. On the notion of regional economic resilience:

Conceptualization and explanation[J]. Journal of Economic Geography, 2014, 15(1): 1-42.

[10] Modica M, Reggiani A. Spatial economic resilience: Overview and perspectives[J]. Networks and Spatial Economics, 2015, 15(2): 211-233.

[11] Carvalho D, Martins H. Urban resilience to future urban heat waves under a climate change scenario: A case study for Porto urban area (Portugal)[J]. Urban Climate, 2017, 19(2): 1-27.

[12] 马慧强, 杨俊, 李哲. 太原市城市复合生态系统调节服务时空格局演化及驱动机制研究[J]. 地理科学, 2021, 41(3): 463-472. [Ma Huiqiang, Yang Jun, Li Zhe. Evolution and driving mechanism of temporal and spatial patterns of regulation services of urban complex ecosystem in Taiyuan[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(3): 463-472.]

[13] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(8): 151-158. [Sun Yang, Zhang Luocheng, Yao Shimou. Evaluating resilience of prefecture cities in the Yangtze River Delta Region from a socio-ecological perspective[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(8): 151-158.]

[14] 修春亮, 魏冶, 王绮. 基于"规模-密度-形态"的大连市城市韧性评估[J]. 地理学报, 2018, 73(12): 2315-2328. [Xiu Chunliang, Wei Ye, Wang Qi. Evaluation of urban resilience of Dalian City based on the perspective of "size-density-morphology"[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(12): 2315-2328.]

[15] 杨航, 侯景伟, 马彩虹, 等. 黄河上游生态脆弱区复合生态系统韧性时空分异——以宁夏为例[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 303-312. [Yang Hang, Hou Jingwei, Ma Caihong, et al. Spatio-temporal differentiation of the composite ecosystem resilience in the ecologically fragile area in the upper reaches of the Yellow River: A case study in Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(2): 303-312.]

[16] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731. [Zhao Ruidong, Fang Chuanglin, Liu Haimeng. Progress and prospect of urban resilience research[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1717-1731.]

[17] Sherrieb K, Norris F H, Galea S. Measuring capacities for community resilience[J]. Social Indicators Research, 2010, 99(2): 227-247.

[18] Spaans M, Waterhout B. Building up resilience in cities worldwide: Rotterdam as participant in the 100 resilient cities programme[J]. Cities, 2017, 61(1): 109-116.

[19] 丁建军, 王璋, 柳艳红, 等. 中国连片特困区经济韧性测度及影响因素分析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(6): 924-937. [Ding Jianjun, Wang Zhang, Liu Yanhong, et al. Measurement of economic resilience of contiguous poverty-stricken areas in China and influencing factor analysis[J]. Progress in Geography, 2020, 39(6): 924-937.]

[20] 田超, 程琳琳, 王义方, 等. 转型期矿业乡村综合效能评价及障碍诊断[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 241-249. [Tian Chao, Cheng Linlin, Wang Yifang, et al. Comprehensive effectiveness evaluation and obstacle diagnosis of mining villages in the transition period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(5): 241-249.]

[21] 王群, 陆林, 杨兴柱. 国外旅游地社会-生态系统恢复力研究进展与启示[J]. 自然资源学报, 2014, 29(5): 894-908. [Wang Qun, Lu Lin, Yang Xingzhu. Research progress and enlightenment of tourism socio-ecological system resilience in foreign countries[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(5): 894-908.]

[22] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 等. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7344-7355. [Wang Xiaofeng, Ma Xue, Feng Xiaoming, et al. Spatial-temporal characteristics of trade-off and synergy of ecosystem services in key vulnerable ecological areas in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7344-7355.]

[23] 孙桂丽, 陆海燕, 郑佳翔, 等. 新疆生态脆弱性时空演变及驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 258-269. [Sun Guili, Lu Haiyan, Zheng Jiaxiang, et al. Spatio-temporal variation of ecological vulnerability in Xinjiang and driving force analysis[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 258-269.]

[24] 李连刚, 张平宇, 谭俊涛, 等. 韧性概念演变与区域经济韧性研究进展[J]. 人文地理, 2019, 34(2): 1-7, 151. [Li Liangang, Zhang Pingyu, Tan Juntao, et al. Review on the evolution of resilience concept and research progress on regional economic resilience[J]. Human Geography, 2019, 34(2): 1-7, 151.]

[25] Martin R. Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks[J]. Journal of Economic Geography, 2011, 12(1): 1-32.

[26] 孙才志, 孟程程. 中国区域水资源系统韧性与效率的发展协调关系评价[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2094-2104. [Sun Caizhi, Meng Chengcheng. Evaluation of the development coordination relationship between resilience and efficiency of regional water resources system in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 2094-2104.]

[27] 冯悦. 基于复合生态系统的祁连山地区韧性度评价[D]. 西安: 西北大学, 2019. [Feng Yue. Evaluation of toughness of Qilian Mountain area based on composite ecosystem[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.]

[28] 梁准. 石家庄市城市韧性综合评估及提升策略[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2021. [Liang Zhun. Comprehensive evaluation and promotion strategy of urban resilience in Shijiazhuang[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2021.]

[29] 刘玒玒. 基于熵权TOPSIS-耦合协调度-灰色关联度的长江经济带水资源承载力综合评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(5): 532-541. [Liu Honghong. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on entropy weight TOPSIS-coupling coordination degree-grey correlation degree[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(5): 532-541.]

Spatiotemporal evolution and obstacle identification of complex ecosystem resilience in the Qilian Mountain area

LIU Honghong, LIU Shufang
(School of Management, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: The Qilian Mountain area is an important ecological function area and one of the most fragile ecological areas in China. Our objective is to study the natural economic-social ecosystem resilience in the Qilian Mountain area to effectively manage ecological challenges. To achieve this, we constructed a three-dimensional spatial vector model, coupling coordination model, and obstacle degree model. These models were employed to measure complex ecosystem resilience and subsystem coupling coordination in the Qilian Mountain area from 2007 to 2021. Additionally, we aimed to reveal obstacles affecting the improvement of the complex ecosystem resilience and analyze the spatial evolution process of complex ecosystem resilience using geographic information system technology. The results show the following: (1) Complex ecosystem resilience in the Qilian Mountain area is increasing, following a spatial decrease trend from the east to the west. Natural subsystem resilience is declining, with a spatial trend of decreasing from the central east to northwest. The economic subsystem resilience is increasing rapidly, with high economic resilience concentrated in the east and north. Social subsystem resilience rises modestly, with high social resilience concentrated in the eastern part of the area. (2) The complex ecosystem resilience coupling in the Qilian Mountain area has considerably improved, reaching a high-level coupling degree, and the degree of coupling coordination shows a fluctuating increase, reaching an intermediate coordination level. (3) The natural subsystem greatly impacts the improvement of complex ecosystem resilience, and the obstacle degree of the indicators from the economic subsystem exhibits a notable increase.

Key words: complex ecosystem resilience; three-dimensional space model; coupling coordination degree; obstacle factor; Qilian Mountain area